

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПРИ ЗАЧЕКАНИВАНИИ ТЕРМОПАР

Ю.Е. Балахнина, Е.А. Андрианова, Ю.К. Атрошенко

Томский политехнический университет

yuliabalacknina@gmail.com

## Введение

На сегодняшний день температура является одним из основных параметров, описывающих состояние технологических объектов и физических процессов. Большинство систем контроля технологических процессов и оборудования базируется на идентификации температурных измерений [1]. Гетерогенные условия эксплуатации оборудования обуславливают широкое распространение контактных датчиков температуры в различных отраслях промышленности, энергетики и машиностроения [2]. Задача оперативного получения достоверных результатов измерения, как правило, сопряжена кроме прочего с вопросами монтажа и эксплуатации измерительных преобразователей в условиях промышленных объектов [3].

Независимо от области применения основное требование, предъявляемое к термоэлектрическим преобразователям, заключается в обеспечении максимальной точности измерений. Одним из наиболее распространенных способов установки поверхностных датчиков температуры является зачеканивание [3]. Наибольшая площадь соприкосновения исследуемого объекта и термопреобразователя позволяет проводить измерения с наименьшей погрешностью. Проблема обеспечения наилучшего теплового контакта с объектом измерения рассматривалась в работах [2–5]. Однако, пока не опубликованы результаты исследования влияния ряда факторов, таких как глубина и диаметр отверстия для зачеканивания промышленных термопар, на характеристики процесса измерения (точность, необходимая продолжительность).

В связи с этим настоящая работа посвящена разработке математической модели процесса теплопередачи в системе «объект измерения – термопара» при использовании зачеканивания в качестве способа монтажа.

## Модель теплопередачи и методы решения

На рис. 1 представлена область решения задачи теплопередачи в рамках текущего исследования.

Математическое описание модели (рис. 1) представляет собой систему дифференциальных уравнений, аналогично приведенным в работе [4].

На внутренних границах системы, представленной на рис. 1, приняты граничные условия IV рода [4].

На границах  $z=0$  и  $r=R$  заданы краевые условия I рода (задается распределение температуры, соответствующее измеряемой температуре).

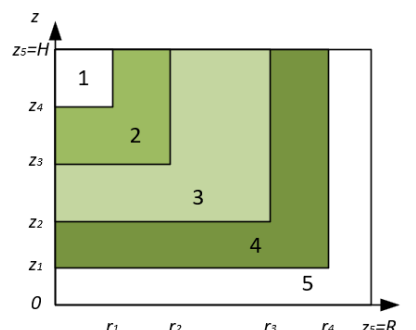


Рис. 1. Область решения задачи теплопередачи: 1 – спай термопары; 2 – керамический чехол; 3 – порошок оксида алюминия; 4 – внешний защитный чехол; 5 – воздушный зазор

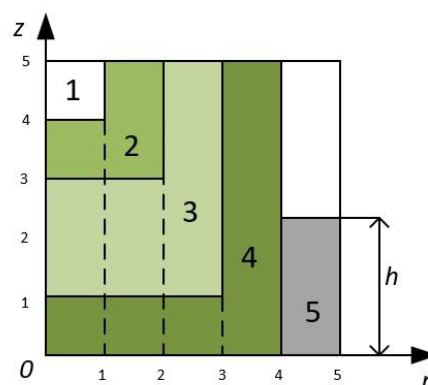


Рис. 2. Область решения задачи теплопередачи при заглублении датчика: 1 – спай термопары; 2 – керамический чехол; 3 – порошок оксида алюминия; 4 – внешний защитный чехол; 5 – воздушный зазор  $h$  – глубина зачеканивания

На границах  $r=0$  и  $z=H$  задаются условия, соответственно  $\partial T/\partial r=0$  и  $\partial T/\partial z=0$ , где  $r$  – радиальная координата, м;  $z$  – осевая координата, м;  $H$  – высота участка ТЭП, м;  $R$  – радиус чувствительного элемента, м;  $T$  – измеряемая температура, К;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Система нестационарных дифференциальных уравнений с соответствующими граничными и краевыми условиями решена с методом конечных разностей. Одномерные разностные уравнения решены методом прогонки на основе неявной четырехточечной разностной схемы [4, 5].

Область решения задачи разбита на равномерную сетку с шагом по радиальной и осевой координатам  $2,5 \cdot 10^{-2}$  мм. Шаг по временной сетке составлял 0,001 с.

## Результаты и обсуждения

Зависимость температуры спая термопары от времени нагрева для различных значений глубины зачеканивания для значений измеряемой температуры 500 К показана на рис. 3.

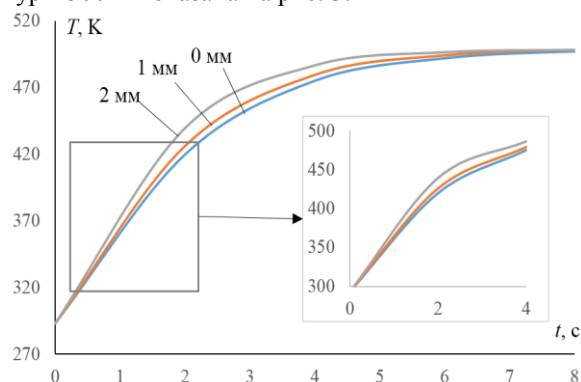


Рис. 3. Зависимость температуры спая термопары от времени нагрева при 500 К.

Из рис. 3 видно, что заглубление чувствительного элемента датчика на 1 мм приводит к сокращению необходимой длительности нагревания до 10 %, а при заглублении на 2 мм – до 25%. При этом с увеличением температуры влияние глубины зачеканивания уменьшается.

На рис. 4 показана зависимость необходимой длительности нагрева датчика температуры в зависимости от материала поверхности объекта измерения. Выбор материала обусловлен широким распространением стали в промышленности и энергетике. Например, для разъемов турбин ТЭС используется сталь марки ЭИ723, в коллекторах парового котла – ТЭС 12Х1М. В паропроводах котельных агрегатов применяют сталь 12МХ [7].

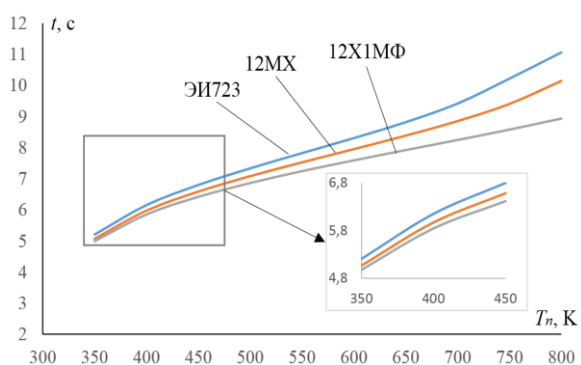


Рис. 4. Зависимость длительности нагрева датчика от материала поверхности объекта измерения и контролируемой температуры

Видно, что для стальных элементов разница в результатах не существенна, что обусловлено незначительным различием теплофизических свойств материалов.

## Заключение

В результате работы разработана модель теплопереноса в системе «преобразователь температуры – объект измерения» при зачеканивании первого в поверхность материала объекта. Полученные результаты позволяют оценить влияние глубины заделки промышленной термопары на необходимую длительность измерения. Разработанная модель позволяет определять требуемые значения длительности нагревания в реальных условиях эксплуатации датчиков с учетом свойств материала объекта измерения. Указанные характеристики представляют ценность при настройке работы систем контроля и управления температуры не только ТЭС, но и других промышленных объектов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 18-38-00028).

## Список использованных источников

1. Farahmand, K., Experimental measurement of fine thermocouple response time in air / K. Farahmand, J.W. Kaufman // *Experimental Heat Transfer*. – 2001. – №. 14. – P. 107–118.
2. Kuznetsov, G.V. Numerical estimation of errors of temperature measurements by thermocouples using special glues and pastes / G.V. Kuznetsov, K.M. Mukhammadeev // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2010. – Vol. 19, № 1. – P. 17–22.
3. Боровкова Т.В., Товстоног В.А., Елисеев В.Н. Оценка точности измерения температуры термопарами при различных способах их размещения на объекте испытания // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2013. №7(19). С. 19.
4. Нучин С.А., Ланин А.В., Просунцов П.В., Кордо М.Н., Забейало М.О., Русин М.Ю. Влияние способа заделки поверхностных термпар на погрешность определения температуры при испытаниях керамических материалов на установках радиационного нагрева // *Инженерно-физический журнал*. 2018. Том 91. №3. С. 628–636.
5. Атрошенко, Ю.К., Стрижак П.А. О влиянии защитной гильзы на погрешности измерения температуры термоэлектрическими преобразователями // *Энергетик*. 2015. №10. С. 52–55.
6. Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Influence of radiative heat and mass transfer mechanism in system water droplet - high-temperature gases on integral characteristics of liquid evaporation // *Thermal Science*. – 2015. – Vol. 19. – № 5. – P. 1541–1552.
7. РД 34.39.201 Инструкция по монтажу трубопроводов пара и воды тепловых электростанций. – М. Главтехуправление, 1973. – 164 с.